

自然岩盤不連続面の 室内一面せん断－透水同時実験方法の提案

三谷 泰浩^{1*}・下田 誠²・江崎 哲郎³・池見 洋明⁴・山上 裕也⁵

¹九州大学大学院工学研究院 建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

²九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

³九州大学大学院工学研究院 建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

⁴九州大学大学院工学研究院 建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

⁵九州電力株式会社 土木部 調査・計画グループ (〒810-8720 福岡市中央区渡辺通二丁目 1-82)

*E-mail: mitani@doc.kyushu-u.ac.jp

岩盤構造物の建設・維持管理においては不連続面の力学的特性を把握することが重要である。しかしながら、自然の不連続面の試料採取から室内実験までの具体的な手順は、経験や実績に基づく様々な方法で行われているのが実状である。そこで、本研究では、原位置での試料の採取から室内せん断－透水同時実験によるその特性の把握に至るまでの検討を行った。その結果、形状が不定形で、かつ、数量の限られる自然岩盤不連続面に対して、適切な実験を行うための供試体の作成方法を示した。さらに、実験方法として、せん断中の垂直载荷方式を一定とするだけでなく、多段階载荷を同時に行うことを提案した。そして本手法を用いた実験結果から、不連続面の正確な強度・透水特性が効率的に得られることを実証した。

Key Words : natural rock joint, laboratory shear test, hydro-mechanical property

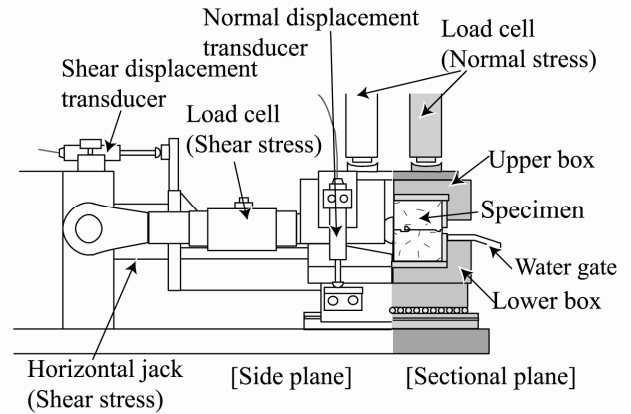
1. はじめに

弱面である不連続面は、岩盤の強度に支配的であり、岩盤構造物の建設、維持管理においては、不連続面の力学的特性を把握することが重要である。しかしながら、自然の岩盤不連続面を採取し、室内実験に用いるための供試体の作成、実験方法、実験結果の整理に至る具体的な手法は、ISRM¹⁾や ASTM²⁾などの指針としては存在するものの、統一された基準は無く、技術者それぞれの経験や過去の実績に基づいて決定されるのが実状である。

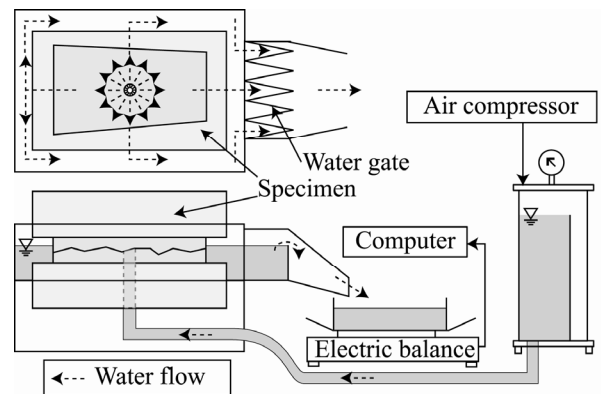
そこで、本研究では信頼性の高い不連続面の特性値を得ることを目的とし、原位置における試料の採取から、実験結果の整理に至るまでの一連の手法について検討、提案する。

2. せん断－透水同時実験装置

本研究では不連続面の力学的特性を評価するための室内実験として、装置が比較的単純であり、せん断面およびせん断方向を規定しやすく、残留域にまで至る大きなせん断変位まで、せん断応力、垂直応力、せん断変位、垂直変位を容易に制御、計測できるという理由から、一



(a) Shear part



(b) Flow part

Fig.1 Direct shear-flow coupling test apparatus.

面せん断実験を採用する。

著者らが独自に開発した実験装置の概念図を Fig. 1(a), (b) に示す。本装置は、Fig.1(a) に示すように、せん断箱上箱を固定し、下箱を移動させてせん断応力を与える構造である。垂直荷重は2本の垂直载荷ジャッキを用いて载荷し、それらの载荷比率は任意に調節することができるため、形状が不定形な不連続面に対し、一様な垂直応力を発生させることができる。また、本装置には Fig. 1(b) に示すように、下部せん断箱底面の中央に注水孔(直径 8 mm) が設けられている。この注水孔から任意の水頭差を与え、水を給水し、供試体下半分に穿孔した細孔(直径 6 mm) を通して不連続面の縁に向かって放射状に透水させる放射流型の透水実験が可能である。不連続面から流出した水は、せん断面が完全に水没するようにその約 5 mm 上に設定された排水側の堰から定水位で越流する。この堰にはラビリンス堰を用いることで越流高さが高くないように考慮している。透水量の計測には、電子天秤を用い、流量はコンピュータを用いて記録される。

3. 試料と供試体

(1) 試料の採取

安定した一面せん断実験を行うためには、不連続面が試料のほぼ中心に位置し、かつ、可能な限り大きな面積を持つような試料の採取方法が望ましいと考えられる。したがって、露頭している不連続面の走向、傾斜をクリノメータによって計測し、不連続面に対し平行にボーリングを行い、試料を採取する方法を採る。できる限り、大きな不連続面を確実に取得できること、さらにはせん断箱の大きさを考慮してボーリングコアの直径は95 mmを採用する。採取したボーリングコアは、直ちに粘性フィルムで保護し、不連続面の初期位置からのずれを防ぐ。

(2) 供試体の作成

せん断-透水同時実験に用いられるせん断箱は、縦 200 mm×横 100 mm×高さ 120 mm の直方体の供試体用に設計されているため、採取したボーリングコアを直接用いることはできない。そこで、Fig. 2 に示すような鋼製のガイドとモールドを用い、試料設置後周囲に固結材料を流し込みせん断箱に納まるような供試体を作成する。以下に供試体作成の具体的な手順を示す。

a) 試料選定および整形

採取されたボーリングコアは、約 50cm 程度の大きさであり、コア軸方向に不連続面を有しているが、目的としている不連続面以外にも複数の系の節理を有している。

このコア試料から異なる系の節理ができる限り少ない部分を選定し、切断する。その後、切り出した試料をせん断箱に納まるサイズに整形するが、試料の破損や不連続面のずれを防ぐため、切断した試料全体をモルタルに埋め込み、せん断箱に入る大きさに試料を整形し、その後周辺のモルタルを取り除き、供試体を作成する。

b) 試料の埋め込み

両側面内側にテフロンシートを貼付した鉄製モールドにガイドを取り付け、そこに固結材料を流し込み、試料の不連続面より下半分を固定する。その際、ガイド底面の4本のネジによって、不連続面がせん断面と一致するように不連続面の位置を調整する。この状態で、24時間放置し、固結材料を硬化させる。固結材料には、二液型エポキシ樹脂系モルタル用固結材(ショーボンド#303A, ショーボンド建設製)と4号珪砂、7号珪砂を配合比2:3:3で混合したものを使用する。この固結材料の一軸圧縮強度は約 50 MPa であり、不連続面の最大せん断応力よりも十分に大きい。供試体下半分が硬化後、供試体上下を反転させ、同様の方法で、試料の不連続面より上半分を固定する。その際、上下のガイドが接触しないように、幅 9 mm のスペーサーを挟む。試料埋め込み手順の概念図を Fig. 3 に示す。またこの際、不連続面内に固結材料が流入しないよう、不連続面周囲をテープにて養生する。

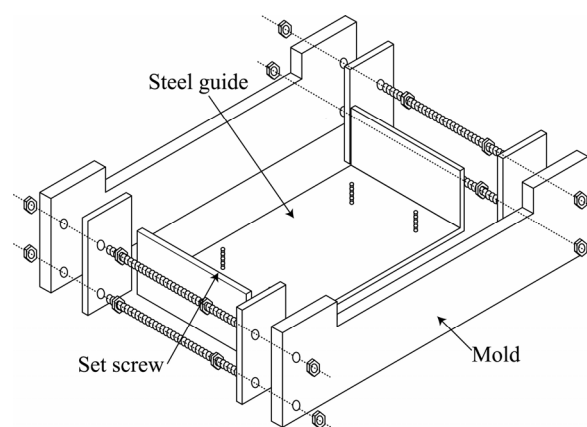


Fig. 2 Schematic design of mold and steel guide.

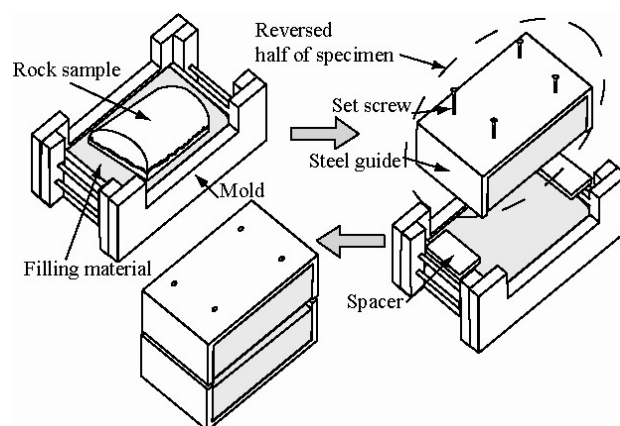


Fig. 3 Process of making specimen with a natural joint.

c) 透水孔の穿孔

固結材料の硬化後、スペーサーおよび、モールドを取り外し、透水実験のための透水孔（直径 6 mm）を供試体下部から不連続面まで貫通させる。

d) 不連続面の計測

不連続面の間隙に挟在物がほとんど存在せず、開口できる供試体に対しては、不連続面外形のスケッチを作成し、開口できない供試体については、不連続面の周囲 4 辺の長さとその位置関係から不連続面の外形を求め、GIS ソフトにより不連続面の面積と重心位置を算出する。

また、開口できる供試体については、実験前に非接触式のレーザー変位計を用いた計測システム³⁾を用いて、不連続面の上面、下面のそれぞれを 1 mm メッシュ間隔で凹凸高さを計測し、表面形状計測を行う。実験後には、すべての供試体に対して表面形状計測を行い、せん断による不連続面の凹凸の破壊状況を評価する。

4. 実験方法

実験方法について Fig. 4 に示すとともに、各実験方法の詳細について以下に示す。

(1) 垂直荷重載荷実験（せん断前）

不連続面の垂直剛性の算出、および、供試体をせん断

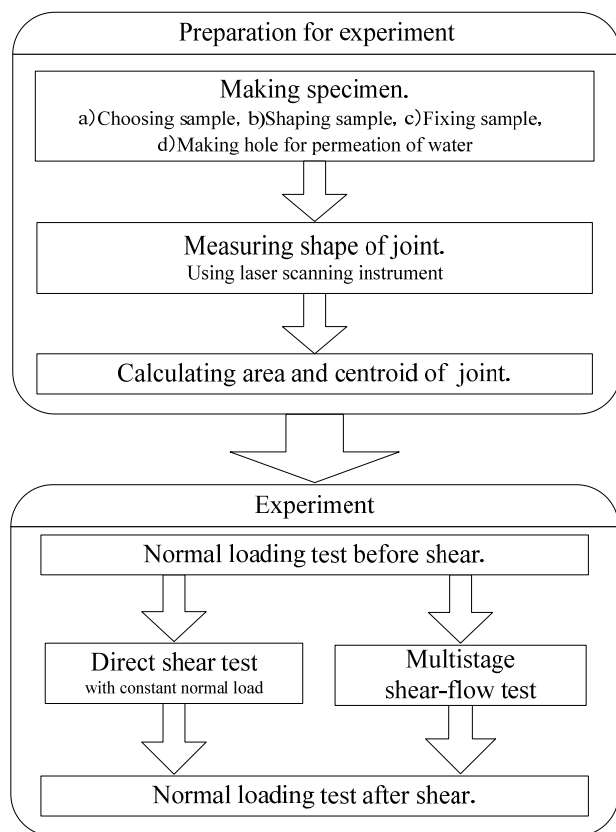


Fig. 4 Flow chart of experiment process.

箱に設置する際の微小なずれを取り除くことを目的として、不連続面の壁面強度以下でかつ、せん断実験時に影響を与えないと考えられる垂直応力まで載荷—除荷を繰り返す。載荷曲線が一定の曲線に収束した後、せん断実験時の所定の垂直荷重まで載荷する。与える垂直荷重は、不連続面の形状が不均一であることから、算出された面積と重心位置から、不連続面に所定の応力が均等に加わるように 2 つの垂直載荷ジャッキの比率を調整して載荷する。

(2) せん断—透水同時実験

不連続面の強度特性、変形特性およびせん断に伴う透水特性の変化を把握することを目的として行う。

自然の不連続面に対して実験を行う場合、全く同一の不連続面を準備することは不可能であるため、同じ不連続面から採取された複数個の供試体を用いて実験を行う。しかしながら、同じ不連続面から複数の供試体を準備することも困難な場合には、同じ不連続面でなくても、性状が同等とみなせる同じ系列の不連続面を用いて一連の試験の供試体として使用する。

せん断時の垂直荷重の載荷方式としては、基本的には垂直応力一定として実験を行う（以下、一定実験と称する）。しかしながら、力学的特性である不連続面のせん断抵抗角および粘着力を得るためには、最低でも 3 個以上の供試体が必要となるが、前述したように供試体数が限られる場合、強度特性を得るためには、1 つの供試体に対して異なる垂直応力一定実験を行う垂直応力多段階載荷実験（以下、多段階実験と称する）を併用することが有効である。

一定実験においては、せん断は不連続面に所定の垂直荷重を与えた後、せん断速度 0.1 mm/min で最大せん断変位 20 mm まで行う。その後せん断応力の初期値のずれを補正するため、垂直応力を維持した状態で、同様の速度でせん断変位 0 mm まで逆方向のせん断実験を行う。

多段階実験では、せん断速度、最大せん断変位は一定実験と同様であるが、せん断応力が残留領域に達する毎に、段階的に垂直荷重を増加させながらせん断を行う。なお、垂直荷重を増加させる前に、せん断変位を若干戻し、せん断方向の拘束を解く。そして、せん断変位 20 mm までせん断を行った後、最終段階の垂直荷重のまま、一定実験と同様にせん断変位 0 mm まで逆方向のせん断を行う。

透水実験は、透水孔が不連続面の強度特性に与える影響を最小限にし、かつ多くの垂直応力下における透水特性を評価するために、多段階実験においてのみ実施し、せん断変位 1 mm 毎にせん断を一時的に止めた状態で行う。

(3) 垂直荷重載荷実験（せん断後）

実験装置および岩石試料のインタクト部分等の垂直剛性を求めるために、せん断後にも垂直荷重載荷実験を行う。その際の垂直荷重は、不連続面が完全に閉塞する程度まで大きな荷重を与える。

5. 結果の整理

(1) 傾斜角による実験結果の補正

自然の不連続面は様な傾斜になっておらず、せん断面と不連続面が水平になるように供試体を作成したとしても、せん断面の傾きをゼロとすることは難しい。そのため、実験後に計測された不連続面の表面形状計測結果から不連続面の平均傾斜角 θ を最小二乗法による平均平面に近似して求め、せん断特性の補正を行う。実験から得られた垂直応力 σ_n' 、せん断応力 τ' 、垂直変位 v' 、せん断変位 u' を次の変換式を用いて、不連続面に働く応力と変位を求める。

$$\sigma_n = \sigma_n' \cos \theta + \tau' \sin \theta \quad (1)$$

$$\tau = \tau' \cos \theta - \sigma_n' \sin \theta \quad (2)$$

$$u = \frac{u'}{\cos \theta} \quad (3)$$

$$v = v' \cos \theta - u' \sin \theta \quad (4)$$

(2) 最大せん断強さ

最大せん断強さ、残留せん断強さ、せん断剛性の算出方法の模式図を Fig. 5 に示す。ダイレーションが急激に増加し始めるせん断変位におけるせん断応力を最大せん断強さ τ_p とする。明確な最大せん断強さが現れない場合も同様にダイレーションカーブから最大せん断強さを規定する。

(3) 残留せん断強さ

ダイレーションの変化率が一定値を示す範囲のせん断

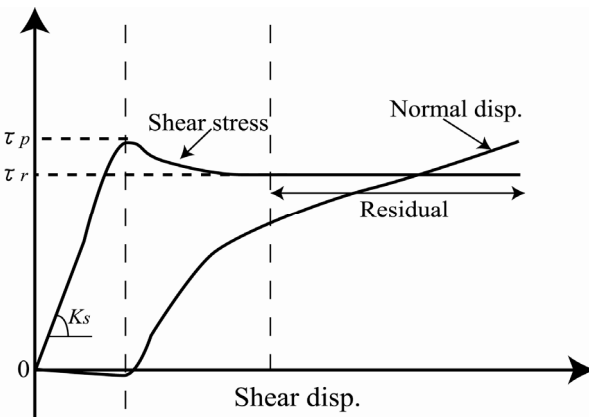


Fig. 5 Procedure for shear property determination

変位を残留領域とし、この範囲のせん断応力の平均値を残留せん断強度 τ_r とする。

(4) せん断剛性

不連続面のせん断剛性 K_s の算出方法として、初期勾配から求める方法、割線勾配から求める方法、原点と最大せん断強度を結ぶ直線勾配から求める方法など、複数の方法が存在する。いずれの方法を採用するかは、現場で必要とされる設計要件によって決定されるが、ここでは、弾性領域における初期勾配から求める方法を採用する。

(5) 垂直剛性

垂直載荷実験で計測された垂直変位は、不連続面の非線形的変形と、岩石インタクト部分、固結材部分、および実験装置の線形的変形の和であり、不連続面自身の垂直変形は直接計測できないため、Fig. 6 の概念図に示す以下の方法によって求める。

せん断前の載荷曲線（曲線 a ）のうち、比較的小さい垂直応力の範囲の実験データを、双曲線関数で近似し、無負荷状態および、データ取得されていない範囲の垂直変位（曲線 a' ）を求める。また、せん断後の載荷曲線（曲線 b ）の内、比較的大きい垂直応力の範囲の実験データを直線で近似し、その傾きを、岩石インタクト部、固結材部分、および実験装置の垂直剛性とする。曲線 a および曲線 b を原点に移動させることにより、載荷実験の垂直変位（曲線 a_0 ）と岩石インタクト部およびせん断箱の変形量（直線 b'_0 ）を求める。この垂直変位の曲線 a' から直線 b' を差し引くことで、各垂直応力における不連続面の変形量（曲線 u_n ）を求めることができる。この曲線を Bandis ら⁴⁾の提案する双曲線関数で近似し式(5)を得る。この近似曲線の各垂直応力における接線勾配から、式(6)のように不連続面の垂直剛性 K_n を得る。

$$\sigma_n = \frac{u_n}{a - bu_n} \quad (5)$$

$$K_n = \frac{d\sigma_n}{du_n} = \frac{(1 + b\sigma_n)^2}{a} \quad (6)$$

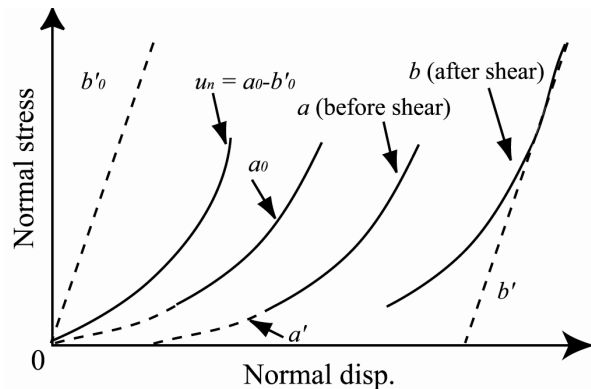


Fig. 6 Procedure for joint stiffness determination

(6) せん断抵抗角および粘着力

最大せん断強さ τ_p と残留せん断強さ τ_r を、横軸を垂直応力、縦軸をせん断強さとして図示し、これらの各点を最小2乗法で近似し、モールクーロンの破壊基準線を求め、基準線の傾きをそれぞれせん断抵抗角 ϕ_p 、 ϕ_r とし、縦軸切片を粘着力 c_p 、 c_r とする。

(7) 透水係数

せん断一透水同時実験は、不連続面の中央から放射流を発生させて行う。不連続面が不定形であるため、透水距離が場所によって異なること、せん断により透水面積が変化するなどの理由から、実験で計測した流量から透水係数を直接算出できない。そこで、不連続面をある間隙幅を持つ平行平板と仮定し、差分法により不連続面内の水頭分布を求め、流量が水理学的間隙幅の3乗に比例すると仮定することで、せん断変位に応じた不連続面の平均的な透水係数を決定する⁵⁾。

6. 実験例

実験結果として、ある地点から採取された不連続面を有する粘板岩のせん断に伴うせん断応力、垂直変位および透水係数の変化を Fig. 7, 8, 9 に示す。図中には、垂直応力1 MPaの一定実験と多段階実験の結果を示す。ただし、せん断一透水同時実験は、多段階実験の際しか行っていないので、その結果のみを示す。

この粘板岩は、基質部の強度が比較的大きく硬岩に分類されるが、不連続面が数多く分布し、しかも不連続面内に薄い挟在物を挟む等の地質的特徴を有する。

せん断応力は、ピーク強度と残留強度の差が小さく、ピーク値を示した後、ゆるやかに残留値へと遷移する。これは、不連続面表面が比較的滑らかなためと考えられる。多段階実験の結果と一定実験の結果を比較すると、一定実験では、明確なピーク値を示すが、多段階実験では、一旦、履歴を受けるため垂直応力を増加させても明確なピーク値を示さない。ただし、同じ垂直応力下では残留せん断応力は、両者ともほぼ等しい。また、せん断剛性は、垂直応力が同じ場合には、一定実験の値が多段階試験に比べて小さくなる傾向がある。これも履歴による表面形状の変化によると考えられる。

垂直変位はいずれのケースも、せん断開始直後は、ほとんど変化せず、せん断応力がピークを示すと同時に増加し始める。これは、せん断応力のピーク値を求める際の1つの基準となることを示す。その後の垂直変位の変化は、緩やかに増加し、最大値に達した後、減少する傾向を示す。また、垂直応力の増加にともない、コンラクタンスの挙動を示す。

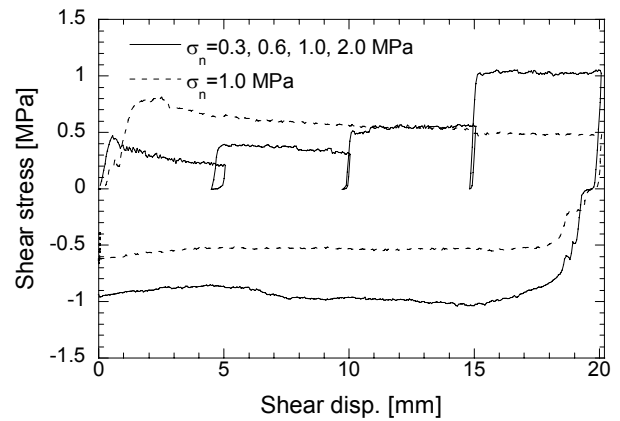


Fig. 7 Shear disp. vs. shear stress.

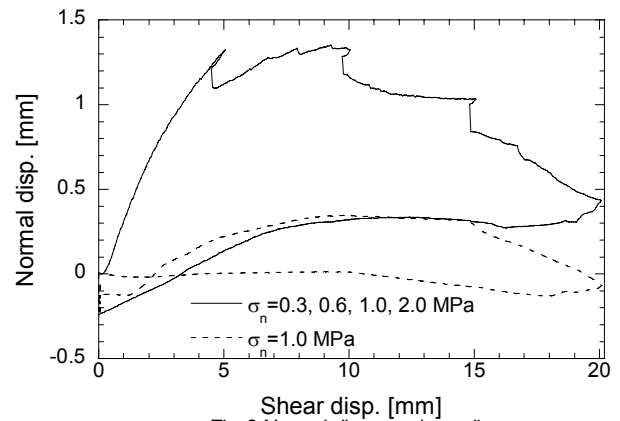


Fig. 8 Normal disp. vs. shear disp.

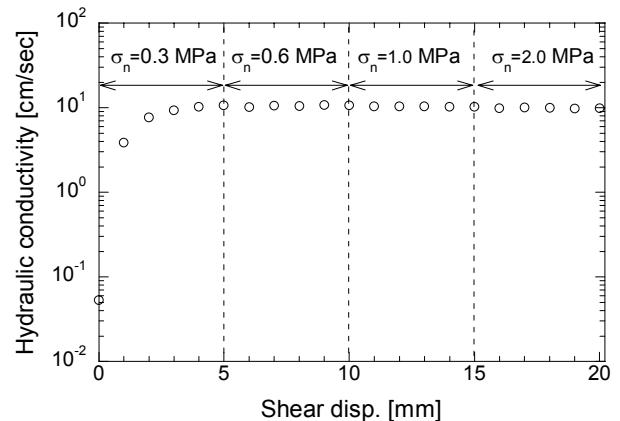


Fig. 9 Shear disp. v.s. hydraulic conductivity

透水係数は、せん断応力がピーク値を示した直後、急激に2オーダーほど増加する。しかし、垂直応力を段階的に増加させても、透水係数は、ほとんど変化せず、垂直応力の違いによる透水係数への影響はほとんどない。垂直変位量の変化との関係からも、せん断変位10 mm以降は、垂直変位が減少するにもかかわらず、透水係数はほとんど変化しない。このことは、せん断時の不連続面の透水係数は、間隙幅の大小だけでなく、不連続面表面の状況にも依存すると考えられる。

Fig. 10 に最大せん断強さと残留せん断強さから求めたモールクーロンの破壊基準線を示す。最大せん断強さ、残留せん断強さともに、垂直応力との間には、高い相関性が見られる。また、垂直載荷実験の結果から、不連続

面の垂直剛性は以下の式で与えられる。

$$K_n = \frac{(1 + 0.764\sigma_n)^2}{0.238} \quad (7)$$

以上の結果から、自然の不連続面のせん断試験では、基本的に、一定実験を実施することが望ましいが、供試体数が限られる場合などは、多段階実験を補助的に実施することで不連続面の諸特性を評価する際に有効であること、ただし、結果の解釈においては、十分に注意をする必要があることが明かとなった。

7. 結論

本研究では、自然の岩盤不連続面のせん断—透水同時実験を行う際の実験方法、手順、結果の整理方法について検討した。その結果について以下にまとめる。

- ・自然の不連続面のせん断実験に適する不連続面試料の採取方法について検討し、採取された試料から供試体を作成する一連の方法を提案した。
- ・レーザー変位計やGISを活用した複雑な自然不連続面の面積、および重心位置の算出方法を提案した。
- ・不連続面の力学的特性を正確に求めるために、独自のせん断—透水同時実験装置を開発した。本装置は、垂直载荷ジャッキを2本備えており、これらの载荷比率を調節することで、外縁が不定形な不連続面にも一様な応力を与えることができる。また、放射流による透水同時実験も行うことができる。
- ・自然の不連続面の一面せん断—透水同時実験を用いて力学・透水特性として、最大せん断強さ、残留せん断強さ、せん断剛性、垂直剛性、透水係数を評価する方法を提案した。
- ・垂直応力一定試験に垂直応力多段階载荷実験を同時に併用することで、試料数に限りのある自然不連続面に対して、効率よくデータを取得できることを示した。

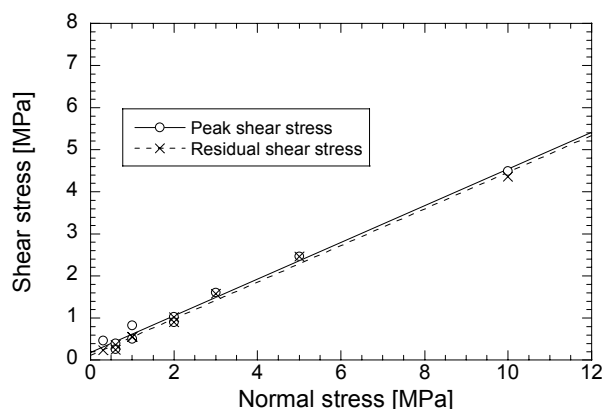


Fig. 10 Mohr-Coulomb criterion.

- ・提案した手法を用いて、せん断—透水同時実験を実施し、せん断に伴う不連続面の力学—透水カップリング特性を評価できることを示した。

参考文献

- 1) ISRM 指針 Vol. 2, 室内せん断試験法の指針, 岩の力学連合会, pp. 27-30, 1983.
- 2) ASTM Designation, Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength tests of Rock Specimen Under Constant Normal Force., D 5607-95.
- 3) 三谷泰浩, 江崎哲郎, 浦川文寛: せん断変形過程における岩盤不連続面の間隙幅分布の評価に関する研究, 第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp 57-64, 2005.
- 4) Bandis, S., Lumsden, A., and Barton, N. : Fundamentals of rock joint deformation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.20, No. 6, pp. 249-268, 1983.
- 5) Esaki, T., Du, S., Mitani, Y., Ikusada, T., Jing, L.: Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.36, No. 5, pp. 641-650, 1999.

PROPOSING OF A NEW DIRECT SHEAR-FLOW COUPLING TEST METHOD ON A NATURAL ROCK JOINT IN LABORATORY

Yasuhiro MITANI, Makoto SHIMODA, Tetsuro ESAKI,
Hiroaki IKEMI, Yuya YAMAGAMI

It is important to understand the mechanical properties of a rock joint. However, practically, testing methods differ in each experimenter. In this research a concrete and detailed procedure of direct shear-flow coupling test in laboratory is proposed and applied to natural rock joint.

As a result, our specimen preparing method enables to use even small and amorphous samples. Furthermore, this paper proposed a method of the direct shear test and an evaluation method of the test results. Experimental results indicate that the behavior of a natural rock joint is determined efficiently by using this multistage shear testing method.